

鋼構造骨組における弾性関節接合の提案と骨組の変形特性に関する研究

著者	小幡 昭彦
号	50
学位授与番号	3619
URL	http://hdl.handle.net/10097/37287

おばた あきひこ
氏 名 小 幡 昭 彦
授 与 学 位 博士(工学)
学位授与年月日 平成18年3月24日
学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 都市・建築学専攻
学 位 論 文 題 目 鋼構造骨組における弾性関節接合の提案と骨組の変形特性に関する研究
指 導 教 員 東北大学教授 山田 大彦
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 山田 大彦 東北大学教授 井上 範夫
東北大学教授 植松 康

論文内容要旨

本論文は、地震による残留変形を生じない、原点指向型の鋼構造骨組の実現を目指し、非線形弾性復元力特性を持つ『弾性関節接合』を提案し、その合理性を明らかにするものである。

本論文は全5章で構成される。以下に本論文の構成に従い、各章の内容について要約する。

第1章 序論

第1章では、本研究の背景と目的および本論文の位置付けと構成について記述した。以下に背景と目的について述べる。

1. 背景

1981年、建築基準法施行令のうち耐震関係の規定が大幅に改定された。いわゆる新耐震設計法である。新耐震設計法では、比較的頻度の高い中地震に対して、構造の各部が弾性範囲内であることを目標とした許容応力度設計を用い、ごくまれにしか起こらないような大地震に対して、構造全体の崩壊を防ぎ、人命の安全を確保することを目標にして保有水平耐力の検討を行うことになっている。現在、わが国の耐震構造設計は、基本的にこの新規定を基として行われている。新耐震設計法では、地震の総エネルギー入力に対する構造物の抵抗力はエネルギー吸収能力であるとし、骨組のエネルギー吸収を積極的に期待した内容となっている。そのため、大きな地震に対して構造部材あるいは接合部品の塑性化を積極的に許容することでエネルギー吸収を図るため、塑性変形に伴う残留変形が免れない。その大きさによっては、建物の継続使用に困難が生じるという問題がある。

1995年の阪神・淡路大震災では、神戸市中央区市街地において1,000件を越す鋼構造建築物が被害を受けた。被害調査報告によると、純ラーメン構造では、柱・梁接合部仕口部分に損傷を受けた建物には被害レベルの高いものが多い。特に、設計、加工ならびに施工において特段不適切な個所が認められないにもかかわらず、溶接部位で脆性的に破断した事例が数多く報告されている。また、破断まで至らなくても、骨組の残留変形が大きく生じることが明らかとなった。このような残留変形が大きく生じた建物は、いずれ解体を余儀なくされるか、または再利用するにしても補修に多大な費用、時間、労力を要すると考えられる。大地震時においても残留変形を生じない骨組の実現は、今後解決されるべき重要な課題となった。

2. 目的

本論文の目的は、地震による残留変形を生じない原点指向型の鋼構造骨組の実現を目指し、非線形弾性復元力特性を持つ『弾性関節接合』を提案し、その合理性を以下の方法を用いて明らかにすることである。

- i. 弾性関節接合の仕組みを適用した試験体により実験的検討を行い、弾性関節接合部の変形特性を把握する。
- ii. i. において明らかにした接合部の変形特性を踏まえた弾性関節接合を持つ骨組の解析手法を提案し、その実用性を骨組モデルの解析により検討し、骨組の変形特性を明確にする。

非線形弾性復元力特性を目指す主な目的は、柱や梁などの主要部材が弾性であることを保証できる限界値を大きくすることで、構造物全体として損傷が軽微で地震前の状態に復旧・再利用が可能である変形領域を増やすことにある。また、耐震性能設計において、建物に損傷を生じない限界値である損傷限界、また、人命に対して保証する限界値である安全限界の他に、修復することによって建築物を復旧・再利用できる限界値を設定することが可能である。

非線形弾性復元力特性を持つ構造は以下に述べる3点について優位点を有する。

- 1) 常時荷重および一次設計レベルような比較的発生頻度の高い中地震時において、接合部は剛接合を保ち、建物は無損傷である。これは、半剛接合法などの大きな変形を生じさせることで応答加速度の低減を期待する構法と比較した場合、主要構造部材以外の建物を構成する部材および部品の損傷を低減させ、居住性を確保すると言った意味で有利である。
- 2) 二次設計レベルの極めてまれに発生する大地震時に対して、弾性関節接合を持つ構造物は接合部において離間に伴う弾性的な回転を生じる。この弾性的な離間回転により構造物の剛性は低下し、地震時の建物の固有周期は長くなり、架構の応答加速度が減少される。このような応答加速度の減少効果は、従来の構造工法では主要構造物の塑性化による剛性低下によって行われてきたが、非線形弾性復元力特性を持つ構造では、弾性範囲での剛性低下が期待できるので、残留変形を起こすことなく加速度を減少させることができる。また、同時にエネルギー吸収は制振装置等を利用し積極的に行う。非線形弾性復元力特性を持つ構造では、二次設計レベルの極めてまれに発生する大地震時に対しても、柱や梁などの主要構造の残留変形がおさえられるので、損傷が軽微で地震前の状態に復旧することが可能である。
- 3) 三次設計レベルの極大地震においてはエネルギー吸収を構造骨組の塑性変形能力にも期待し、層崩壊に至らないように崩壊機構を形成し、設計を行うことで建物内外の人命を保護する。

第2章 弾性関節接合の仕組みと特性

第2章では、本研究で提案する弾性関節接合の概要、システムの原理と力学的な特性について記述した。

図1は弾性関節接合を柱・梁接合部に適用した場合の概念図である。弾性関節接合は柱脚部にも適用する。弾性関節接合では、梁は柱を貫通する極めて長い高強度で弾性範囲が大きい線材（接合ボルト）で圧着接合される。接合ボルトには弾性限界耐力の半分程度の初期張力が加えられる。中程度以下の地震に対しては、接合ボルトの初期張力により接合部は剛接合として働く。さらに強い地震に対しては、接合ボルトの高弾性特性を活かして、柱と梁端の圧着面における離間に伴う回転を許容する。これにより、部材の降伏は離間に伴い圧縮力を伝達し回転軸となる部位の極めて狭い範囲に限定されることにな

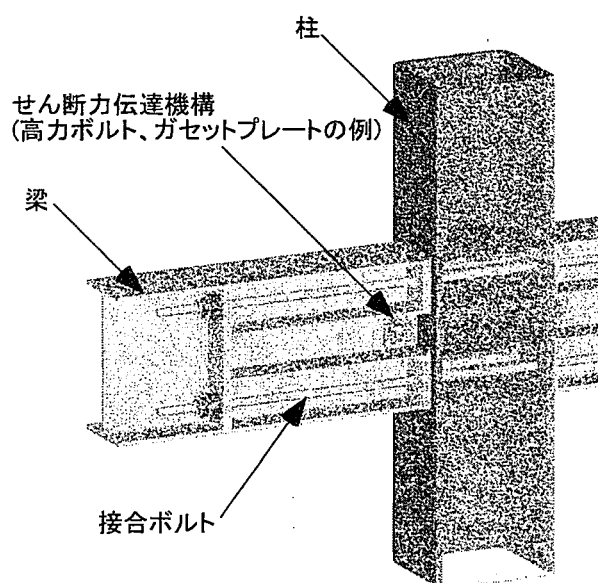


図1 弾性関節接合概念図

る。なお、接合ボルトは常に弾性範囲に在るものとする。本論文では、接合ボルトとして基本的にはストランドワイヤーを用いる。また、力学的特性の異なる接合ボルトの一例としてアラミド繊維ロープの利用についても検討する。接合ボルトに関して、配置、長さおよび本数等は接合部の力学的特性に直接影響を及ぼす要因である。接合部の力学的特性について目標を設定し、それに近づくよう接合ボルトの配置、長さを検討する。弾性関節接合では、二次設計レベルの極めてまれに発生する大地震時に対してまでは、エネルギー吸収・逸散要素と剛性・耐力要素を原則的に分離して捉える。エネルギー吸収に関しては、交換可能な部材の塑性化や制振装置を積極的に用い、柱・梁等の主要構造部材には、剛性・耐力的な要素のみ負担させ、残留変形防止を図ることができる。弾性関節接合では、接合部内における力の伝達の役割分担、つまりせん断力を伝達する部分と曲げモーメントを伝達する部分が明確に分離していることが重要である。せん断力伝達機構については、現在、接合部の離間・回転および骨組の組立・解体等を考慮しつつ検討する。接合部分が離間することに伴い、回転軸となるフランジ上端部および下端部は、接合ボルトに働く張力の総和と同等の圧縮力が伝達され、応力集中が予想される。そのため、梁母材の局所的変形を防ぐために、接合部分近傍および接合ボルト導入部分にはあらかじめ補強が必要である。梁補強に関しては、第3章の実験においてパラメータとして取り扱う。

第3章 弾性関節接合部を持つ単純梁の片振幅繰返し載荷試験

第3章では、弾性関節接合の仕組みを適用した単純梁試験体について、片振幅繰返し載荷を行い、接合部における大まかな変形挙動、特に離間時の挙動や接合部としての変形能力について観察、考察を行った。同時に、実験における試験体に対して、接合部に直列系で剛-弾性系復元力特性の非線形弾性回転バネを持つ梁モデルを考え、梁の変形性能に関して近似的に計算を行い、実験結果との比較により、回転バネモデルの妥当性を検討した。実験変数は、接合ボルト本数、長さおよび圧縮力に対する補強方法である。実験結果より、最大部材角が約 $1/70$ まで達していながら弾性関節接合の腱であるストランドワイヤーが十分弾性範囲にあり、圧縮力を受ける回転軸付近の降伏領域も狭い範囲に限定されていることから、本実験における試験体が、原点指向型の非線形弾性的な挙動を示すことが確かめられた。また、すべての試験体で、実験結果は回転バネモデル計算結果とおおむね良く対応していると言え、回転バネモデルの妥当性が確認できた。

また、弾性関節接合において、接合ボルトの変形特性は離間荷重や離間後の剛性などに直接影響を及ぼす要因である。上記の実験において、接合ボルトはストランドワイヤーを用いた。接合ボルトは、高耐力で弾性範囲が大きい線材であることが望ましい。本章では、接合ボルト材料のひとつの可能性としてアラミド繊維ロープについて注目した。アラミド繊維ロープは、履歴ループを描く特性を持つが、あらかじめ大きな張力を経験させることにより、一定の荷重領域において高い剛性を維持できることがわかった。また、アラミド繊維ロープを弾性関節接合の接合ボルトとして使用する場合は、予め大きな経験張力を与えることにより、その主な変形特性はストランドワイヤーを使用した場合の実験と同様の傾向が得られるということを確認した。弾性関節接合の接合ボルトとして、アラミド繊維ロープの使用可能性については、本実験によって得られた結果を踏まえた上で、アラミド繊維ロープの耐火性能、耐リラクセーション性能、耐クリープ性能などについて引き続き考察を行い、検討する必要がある。

第4章 弾性関節接合部を持つ鋼構造骨組の解析手法の提案と骨組の変形特性

第4章では、弾性関節接合を適用した骨組の変形性能を検討するため、第3章において提案した剛-弾性系の非線形弾性回転バネをもつ要素を用いて有限要素法の定式化および解析方法の提案を行った。また、提案した手法を使用し、弾性関節接合を持つ骨組について解析をおこない、骨組の変形特性、特に、弾性関節接合部において離間後に剛性が低下する現象が、骨組の変形・応力にどのような影響を与えるかを中心に調べた。

弾性関節接合では中柱において二つの梁が柱を介して一群の接合ボルトによって接合されているため、それぞれの梁の離間状況が隣り合う梁の離間・変位に影響を与える。そのため、ある要素の材端力と要素端変位の関係式に、未知数である他の要素の離間回転角が存在し、通常の有限要素解析では解くことができず、弾性関節接合を用いた骨組に適応した解析方法が必要となる。本論文では補正項を用いた収斂計算による解析手法を提案し、その有用性を柱・梁十字型接合部モデル、4層3スパン骨組モデルの解析により明確にする。同時に、弾性関節接合を適用した柱・梁十字型モデル、4層3スパンモデルの変形特性について解析的な考察を行う。特に、4層3スパンモデル解析に関して、弾性関節接合を用いた骨組では、モーメント負担の厳しい部位から離間することで、骨組の層間変形角増分は増加し、また、離間した接合部において回転剛性が低下することで、モーメント負担を骨組全体に効率よく分散させることができることを確認した。

第5章 結論

本論文で得られた成果を総括した。

本論文では、地震による残留変形を生じない原点指向型の鋼構造骨組の実現を目指し、非線形弾性復元力特性を持つ『弾性関節接合』を提案し、その合理性を明らかにするとともに、弾性関節接合における接合部の離間および回転性能に関して明確にした。また、明確にされた離間回転性能を基に、本論文で解析手法を提案したことにより、弾性関節接合の合理的な設計への道を切り拓くことができた。本論文が鋼構造骨組における弾性関節接合の実現への足がかりとなることを期待する。

論文審査結果の要旨

近年、地震被害の軽減を目的として、免震・制振装置の開発や大地震後に残留変形を生じない新たな構造の仕組の開発などが活発に進められている。大地震後に倒壊を免れても大きな残留変形を生じてしまうと、建物の継続使用が損なわれる、解体を余儀なくされる、あるいは多大の費用や時間をかけて修復するなど、深刻な問題となる。本論文は、大地震による大変形を経験した後でも残留変形を生じない原点指向型の鋼構造骨組の実現を目指し、力の伝達機構とエネルギー吸収機構との分離を前提として非線形弾性復原力特性を持つ弾性関節接合を提案し、実験と単純力学モデルにより仕組を示すと共に、特殊な繰返し計算法を提案して骨組解析し、弾性関節骨組の合理性を明らかにすることを目的としたもので、全5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、本論文で提案する弾性関節接合について、仕組とその力学的特性の概念を述べている。提案による弾性関節接合部は、柱と梁あるいは基礎と柱脚の接合に適用されるが、高張力の接合材に適度の初期張力を導入することによって圧着接合され、梁端モーメントあるいは柱脚モーメントがある大きさに達するまでは剛接合であり、それ以上のモーメントでは有限回転剛性を持つ弾性回転バネを介したヒンジになるとしている。以上の特性により圧着部位は非線形弾性回転特性を持つことを示している。これは、大変形時の応答加速度の低減、長周期化および変形の促進に伴う制振装置の稼働性の向上などを計るものであり、注目される。

第3章では、中央で2分されたH形鋼梁中央の断面部、フランジ及びウェブを補強し改めて弾性関節接合した梁を試験体として片振り繰返し載荷実験を行い、弾性関節接合部における非線形弾性変形特性について実験的に明らかにしている。接合材には高張力ストランドワイヤーあるいはアラミド繊維ロープなどが試用され、張力導入と調整のために考案した定着機構が採用されている。試験パラメーターには初期張力レベル、回転剛性レベル、補剛レベルが設定されている。更に本試験の結果は簡単な非線形弾性回転バネモデルにより精度良くモデル化できることを明らかにし、弾性関節接合の力学モデルとして骨組解析を可能にしている。これは新しい知見である。

第4章では、等価静的地震荷重を受ける鋼構造弾性関節骨組について、特殊な繰返し計算手法に基づく幾何学的非線型解析手法を提案している。骨組の各層において中間に連続して位置する梁は柱を介して一緒に弾性関節接合されることから、回転を起こした各梁要素における釣合方程式は要素ごとに閉じた形式とはなり得ないが、本論文では回転によって付加される項を不釣り合い項即ち補正項として扱い、繰返し計算を導入することで収れん解が得られることを示した。これは新しい知見である。十字形要素骨組の数値計算のほか、多層多スパンの均等あるいは不均等ラーメンなどを対象として数値解析を実施し、弾性関節骨組が剛接合ラーメンと同様にモーメント分布の再配分を伴いながら安定して大変形に至り得ることを明らかにしている。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、鋼構造骨組について原点指向型の非線形弾性回転変形特性を持つ弾性関節接合を提案し、要素実験によりその仕組とモデル化を明らかにし、更に特殊な繰返し計算手法による骨組解析法を提案し、実際の鋼構造骨組の数値解析によって弾性関節骨組の合理性を明らかにし、新たな性能を有し得る鋼構造建築の展望を示したものであり、都市・建築学の発展に寄与するところが少ない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。